4E

УДК 681.3.01:519.67

Ю.В. Емец
Одесский национальный политехнический университет, Украина

Оценивание параметра мультипликативного шума на изображении с помощью мультифрактальных показателей

Разработан метод оценивания параметра мультипликативного шума по мультифрактальному показателю. Исследованы характеристики разработанного метода на тестовых изображениях.

Введение

Проблемой большинства систем интерпретации радиолокационных или медицинских изображений является большой объем информации, которая подлежит обработке. Вследствие этого применяются интеллектуальные системы обработки изображений, содержащие несколько процедур, каждая из которых имеет свою цель. Интерпретация результатов обработки изображений выполняется процедурами обработки высокого уровня и зависит от результатов работы процедур низкого уровня. При регистрации, кодировании и передаче изображений возникают неизбежные помехи, которые влияют на результат интерпретации последних. Для улучшения качества изображения перед процедурами обработки высокого уровня (сегментацией, идентификацией, распознаванием) применяются методы предварительной обработки изображений.

Большинство методов предварительной обработки изображений [1], [2] и некоторые методы контурной сегментации [3], [4] предполагают, что характер шума и его статистические параметры известны. Во многих практических задачах нет априорных сведений о характере шума и его статистических параметрах либо такая информация труднодоступна [5]. Однако эта информация определяет качество фильтрации или контурной сегментации изображений. Например, завышенная оценка уровня аддитивной гауссовской помехи ведет к размыванию контуров объектов, что также отражается на ошибке распознавания. В некоторых случаях от системы обработки изображений может потребоваться работа в «слепом» режиме. Тогда параметры шума идентифицируются по наблюдаемому изображению (рис. 1).



Рисунок 1 – Структурная схема предварительной обработки изображений

Диапазон шумов, встречающихся при обработке изображений, достаточно широк [6], [7].

В системах, использующих естественное освещение, часто возникают пространственные изменения освещенности, которые являются причиной мультипликативной помехи на изображении. Она моделируется как

$$I(x,y) = I_0(x,y)R(x,y), \quad (1)$$

где $I(x,y)$ – полутоновое изображение, $I_0(x,y)$ – отражающая способность объекта, $R(x,y)$ – освещенность объекта, x, y – пространственные координаты. Для того чтобы структура и оценки параметров системы автоматизированной идентификации шума были обоснованными, необходимо выбрать модель помеховой ситуации.

Статистическая модель помеховой ситуации для мультипликативного шума имеет вид (1). Для подавления мультипликативного шума существуют особые методы предварительной обработки изображений, однако помеховую ситуацию оценивает специалист в области распознавания изображений в неавтоматизированном режиме. Очевидно, что неавтоматизированная идентификация шума требует от оператора квалификации эксперта. Неточная оценка помеховой ситуации или параметров шума могут привести к некачественной предварительной обработке. Это обусловлено тем, что при выборе метода предварительной обработки и его параметров необходима априорная информация о процессе формирования изображений. Часто такая информация отсутствует, поэтому параметры метода предварительной обработки изображений подбираются путем настройки, которая не всегда позволяет отразить помеховую ситуацию. Это влияет на дальнейший процесс обработки изображений. Например, недооценка уровня мультипликативной помехи вызывает большие разрывы контуров объектов изображений при решении задачи контурной сегментации. Это, в свою очередь, влияет на ошибку распознавания этих объектов. Поэтому актуальной является проблема автоматизации процедуры идентификации шума на изображениях.

Целью данной работы являлось снижение погрешности оценивания отношения сигнал/шум для мультипликативного шума на изображениях путем использования мультифрактальных показателей.

Для достижения поставленной цели решены **следующие задачи**:

– получение уравнений регрессии отношения сигнал/шум для мультипликативного шума на значения мультифрактальных показателей и оценивание качества этих уравнений;

– разработка метода оценивания параметра мультипликативного шума по мультифрактальному показателю;

– исследование характеристик разработанного метода на тестовых изображениях.

Оценку отношения сигнал/шум для мультипликативного шума на изображениях целесообразно проводить на основе зависимости статистических характеристик изображения от масштаба данных.

Изложение основного материала

При анализе зависимости статистической информации от масштаба данных используется два подхода: структурные функции и сингулярные меры [8]. Под структурными функциями понимают статистические моменты абсолютных разностей, зависящие от масштаба на некотором интервале его значений. Приведем определение структурной функции для одномерных данных, представляющих значения интенсивности *i*-го столбца изображения $I(x, y_i), \quad x = 1, ..., N$, где N – число пикселей в столбце изображения.

Разностью r-го порядка функции $I(x, y_i)$ называется

$$\Delta I(r, x, y_i) = I(x+r, y_i) - I(x, y_i), \quad x = 1, ..., N-r.$$

Определим степенную зависимость $\varsigma(\tau)$ момента порядка τ $\left|\Delta I(r, x, y_i)\right|^{\tau}$ от масштаба r как

$$\left\langle \left|\Delta I(r, x, y_i)\right|^{\tau} \right\rangle \propto \left(\frac{r}{N}\right)^{\varsigma(\tau)}, \quad \tau \geq 0, \tag{2}$$

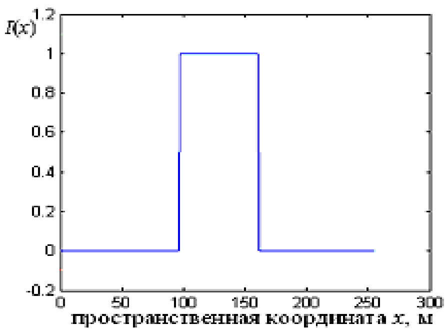
где $\langle \cdot \rangle$ – означают усреднение по переменной x.

На основании (2) в работе [8] введен мультифрактальный показатель

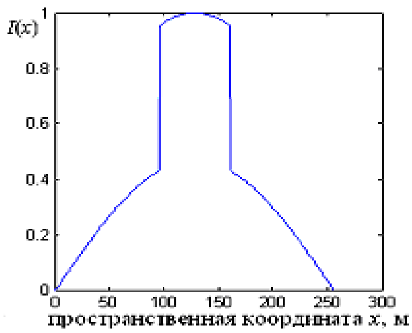
$$H_1 = \varsigma(1).$$

Наибольшее возможное значение для $H_1 = 1$ достигается для почти всюду дифференцируемых функций. Если $H_1 = 0$, $I(x, y_i)$ – стационарный процесс, график которого заполняет пространство.

На рис. 2 показан характер зависимости мультифрактального показателя H_1 от вида помехи для столбца тестового изображения, содержащего один объект. H_1 в этих случаях равно 1,0133 и 0,99685 соответственно.



а)



б)

Рисунок 2 – Значения интенсивности столбца тестового изображения (а) и они же для изображения, пораженного мультипликативной помехой (б)

Для вычисления H_1 в результате логарифмирования (2) получаем

$$\log \left\langle \left|\Delta I(r, x, y_i)\right|^{\tau} \right\rangle = \varsigma(\tau) \log\left(\frac{r}{N}\right) + C,$$

где C – некоторая константа. Значение $H_1 = \varsigma(1)$ находим путем определения параметров линейной регрессионной зависимости $\log \left\langle \left|\Delta I(r, x, y_i)\right|^{\tau} \right\rangle$ от $\log\left(\frac{r}{N}\right)$.

Другим подходом к мультифрактальному анализу данных являются сингулярные меры, представляющие собой локально усредненный модуль градиента изображения.

В основе определения сингулярной меры лежит понятие нормализованной разности 1-го порядка. Ее значения вычисляются в каждой точке столбца изображения по формуле

$$\varepsilon(1, x, y_i) = \frac{\left|\Delta I(1, x, y_i)\right|}{\left\langle \left|\Delta I(1, x, y_i)\right| \right\rangle}, \quad x = 1, ..., N-1,$$

где $\left\langle \left|\Delta I(r, x, y_i)\right| \right\rangle = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^{N} \left|\Delta I(1, x, y_i)\right|$.

Пусть масштаб r принимает значения 1, 2, 4, …, N. Тогда сингулярная мера $\varepsilon(r,x,y_i)$ определяется как

$$\varepsilon(r,x,y_i)=\frac{1}{r}\sum_{x'=x}^{x+r-1}\varepsilon(1,x',y_i),\quad x=1,...,N-r.$$

Определим функцию $K(\tau)$, выражающую степенную зависимость сингулярной меры от масштаба, по формуле

$$\left\langle \varepsilon(r,x,y_i)^{\tau}\right\rangle \propto \left(\frac{r}{N}\right)^{-K(\tau)},\quad \tau\geq 0. \tag{3}$$

В смысле сингулярных мер значения интенсивности изображения характеризуются мультифрактальным показателем

$$C_1=K'(1)\geq 0.$$

Наибольшее значение C_1, равное 1, достигается для случайно расположенных δ-функций, вся энергия которых сконцентрирована в отдельных точках. Случай $C_1\to 0$ (наименьшему значению) достигается для случайно расположенных функций Хевисайда. Таким образом мультифрактальный показатель C_1 характеризует уровень импульсного шума на изображении.

Для вычисления C_1 в результате логарифмирования (3) имеем

$$\log\left\langle \varepsilon(r,x,y_i)^{\tau}\right\rangle = -K(\tau)\log\left(\frac{r}{N}\right)+C',$$

где C' – некоторая константа. Значение C_1 определяем как аппроксимацию производной функции $K(\tau)$ в точке $\tau=1$.

Приведенные определения структурной функции и сингулярной меры позволяют вычислять мультифрактальные показатели H_1 и C_1 для одномерных данных. Для обработки изображений, представленных матрицами дискретных отсчетов интенсивности, введены показатели H_1, C_1 по направлениям x, y: H_x, H_y, H_{xy}, C_x, C_y, C_{xy} соответственно. При определении H_x, C_x разности r-го порядка вычисляются и усредняются по строкам изображения. При вычислении H_y, C_y обработка производится по столбцам изображения.

В процессе определения H_{xy}, C_{xy} разности r-го порядка вычисляются и усредняются по двумерным окрестностям пикселей изображения.

В работе [9] получены графики зависимостей значений мультифрактальных показателей от отношения сигнал/шум для мультипликативного диагонального шума (рис. 3) и вертикального (рис. 4) на тестовом изображении.

У мультипликативного шума вертикального и мультипликативного горизонтального размеры идентичны, т.к. изображение центрально-симметричное, а мультипликативная помеха моделируется детерминированной функцией пространственной координаты.

На основе этих зависимостей в данной работе осуществляется оценивание параметра мультипликативного шума. Получим уравнения регрессии, описывающие зависимость отношения сигнал/шум q по мощности от значений показателей H_x, H_y, H_{xy}, C_x, C_{xy}. В качестве регрессионной зависимости выбрана полиномиальная. Степень полинома n является параметром метода оценивания.

Коэффициенты полинома регрессии оценивались методом наименьших квадратов, который используется для приближения функций, заданных числовым массивом [10].

Полученные регрессионные зависимости изображены для мультипликативного диагонального шума на рис. 5 и мультипликативного вертикального шума на рис. 6.

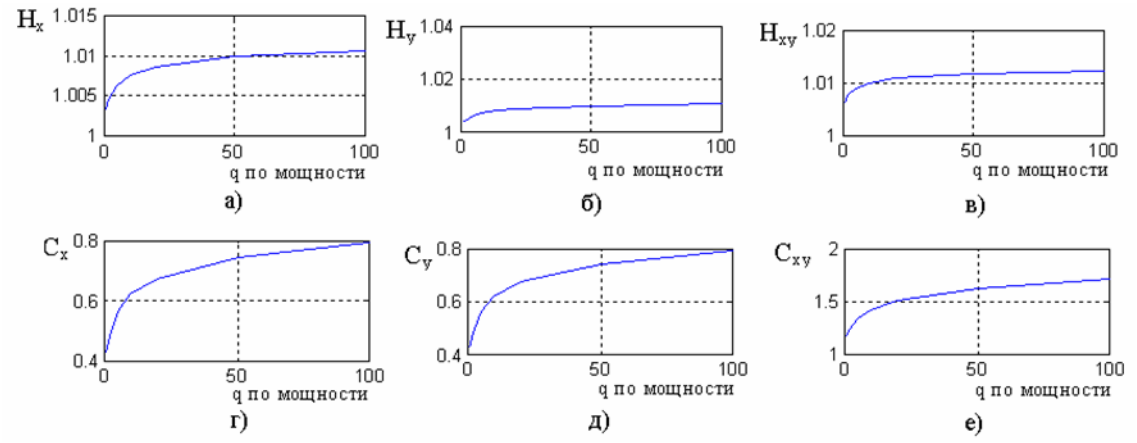


Рисунок 3 – График зависимости мультифрактальных показателей H_x (а), H_y (б), H_{xy} (в), C_x (г), C_y (д), C_{xy} (е) от отношения сигнал/шум для мультипликативного диагонального шума

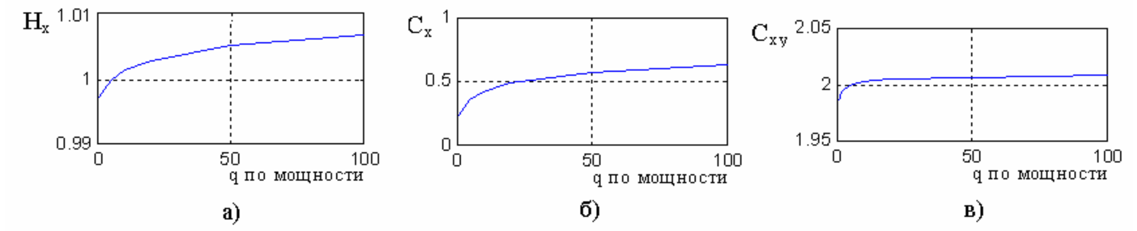


Рисунок 4 – График зависимости мультифрактальных показателей H_x (а), C_x (б), C_{xy} (в) от отношения сигнал/шум для мультипликативного вертикального шума

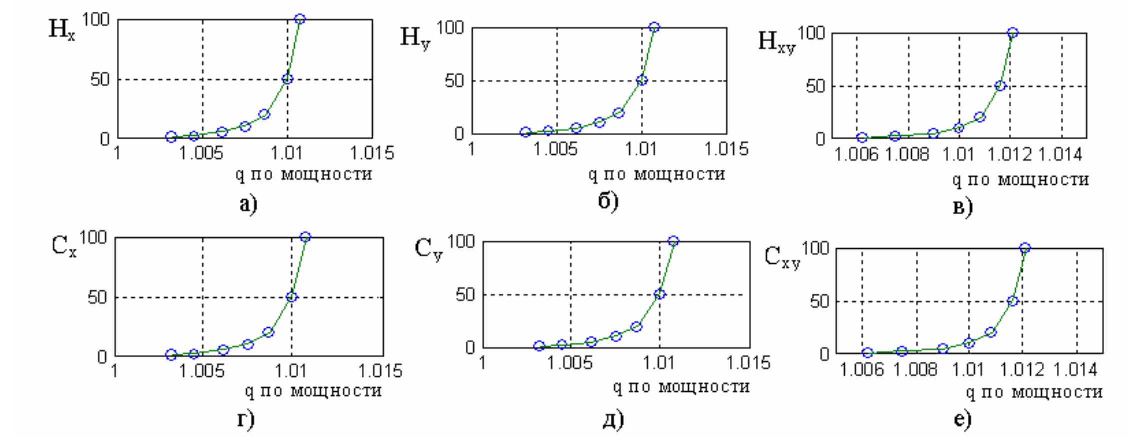


Рисунок 5 – Регрессионная зависимость q по мощности для мультипликативного шума от H_x (а), H_y (б), H_{xy} (в), C_x (г), C_y (д) C_{xy} (е)

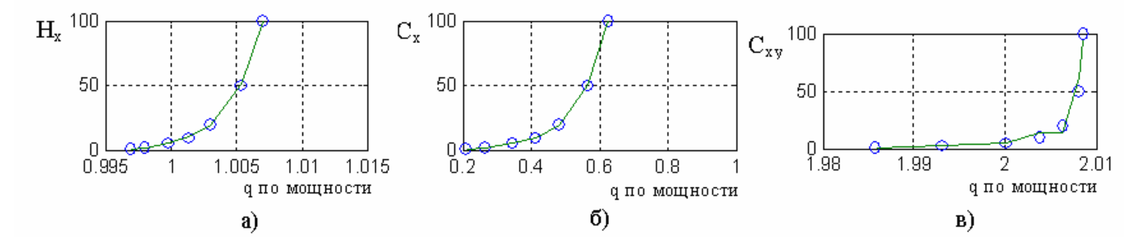


Рисунок 6 – Регрессионная зависимость q по мощности для мультипликативного вертикального шума от H_x (а), C_x (б), C_{xy} (в)

Качество уравнений регрессии отношения сигнал/шум для мультипликативного диагонального шума на значения H_x, H_y, H_{xy}, C_x, C_{xy} и для мультипликативного вертикального шума на значения H_x, C_x, C_{xy} определялось с помощью коэффициента детерминации по формуле [10]:

$$R^2 = 1 - \frac{\Delta_m}{\Delta_s},$$

где Δ_m – дисперсия остаточных данных; Δ_s – дисперсия исходных данных.

Значения коэффициентов детерминации для определения качества аппроксимации полиномом 8-й степени отношения сигнал/шум для мультипликативного диагонального от значений H_x, H_y, H_{xy}, C_x, C_y, C_{xy} и вертикального шума от значений H_x, C_x, C_{xy} приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты детерминации при аппроксимации зависимости отношения сигнал/шум для мультипликативного диагонального шума от значений мультифрактальных показателей H_x, H_y, H_{xy}, C_x, C_y, C_{xy}

Показатель	Дисперсия остатка	Дисперсия исходных данных	Коэффициент детерминации
H_x	0,1057	1,3301e+003	1,2585e+004
H_y	0,1057	1,3301e+003	1,2585e+004
H_{xy}	0,2147	1,3301e+003	6,1961e+003
C_x	2,1972 e-025	1,3301e+003	6,0538e+027
C_y	2,1972 e-025	1,3301e+003	6,0538e+027
C_{xy}	2,3979 e-023	1,3301e+003	5,5471e+025

Таблица 2 – Коэффициенты детерминации при аппроксимации зависимости отношения сигнал/шум для мультипликативного вертикального шума от значений мультифрактальных показателей H_x, C_x, C_{xy}

Показатель	Дисперсия остатка	Дисперсия исходных данных	Коэффициент детерминации
H_x	0,0065	1,3301 e+003	2,0475 e+005
C_x	9,5264 e-028	1,3301 e+003	1,3963 e+030
C_{xy}	43,5515	1,3301 e+003	30,5419

Из шести исследованных зависимостей выбрана та, для которой коэффициент детерминации максимален. Для каждого случая – это зависимость q от C_x. Она аппроксимируется полиномом 8-й степени:

$$q = a_0 + a_1 C_x + a_2 C_x^2 + a_3 C_x^3 + \ldots + a_8 C_x^8, \qquad (4)$$

где $a_0, a_1, \ldots, a_8$ – коэффициенты аппроксимирующего полинома.

С учетом этой формулы метод оценивания отношения сигнал/шум для мультипликативного диагонального и вертикального шума сформулируем следующим образом:

– для исходного изображения оценить C_x;

– с использованием формулы (4) вычислить отношение сигнал/шум для мультипликативного диагонального и вертикального шума.

Для оценивания C_x предложен следующий алгоритм.

1. Задаем максимальный размер окрестности для усреднения градиентного поля $r_{max} = 30$ и задаем последовательность значений порядка момента q из интервала (0,5; 1,5) с шагом 0,25.

2. Для определения значения мультифрактального показателя C_x вычисляем градиентное поле изображения по формуле:

$$\left|\delta_1 I(1, x, y)\right| = \left|I(x, y+1) - I(x, y)\right|, \quad x = 1,\ldots,N;\ y = 1, \ldots, N-1$$

3. Усредняем градиентное поле изображения по окрестности размера 1хr, изменяя r от 1 до r_{max}. В результате получаем для каждого r изображение $b_1(r, x, y)$ такого же размера, как исходное.

4. Полученное изображение $b_1(r, x, y)$ возводим в степень q поэлементно и вычисляем среднее абсолютное значение интенсивности $m(r, q)$. Получаем последовательность значений $m(r, q)$, $r = 1, \ldots, r_{max}$.

5. Для каждого значения q выполняем линейную регрессию $ln(m(r, q))$ на $ln(r)$, $r = 1, \ldots, r_{max}$. Значения коэффициента при старшей степени уравнений регрессии для разных q формируют последовательность $s(q)$.

6. Выполняем регрессию полиномом 4-й степени $ln(s(q))$ на $ln(q)$.

7. С учетом значений коэффициентов полинома регрессии мультифрактальный показатель C_x вычисляется по формуле:

$$C_x = 4a_4 + 3a_3 + 2a_2 + a_1,$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты регрессионного полинома, соответствующие степеням 1, 2, 3, 4 соответственно.

Экспериментальные исследования и выводы

Экспериментальные исследования предложенного метода проведены на изображении размером 256×256 пикселей, в центре которого – белый квадрат 64×64 пикселя на черном фоне. На это изображение накладывались следующие виды помех: мультипликативный горизонтальный, вертикальный, диагональный шум, для которого $R(x, y) = A\sin 2\pi\omega x\Delta$, где частота дискретизации $\Delta = 1 / 256$, $\omega = 0{,}5$, A определяется, чтобы отношение сигнал/шум $q \in \{100; 50; 20; 10; 5; 2; 1\}$.

Для полученных изображений вычисляем мультифрактальный показатель C_x. Согласно предложенному алгоритму и оценивался параметр отношения сигнал/шум для мультипликативного шума по формуле (5).

Оценка количества полученных результатов выполнялась с помощью относительной и абсолютной погрешностей. Эти погрешности определяются следующим образом.

Пусть a – точное значение, a^* – приближенное значение некоторой величины. Абсолютной погрешностью приближенного значения a^* называется величина $\Delta(a^*) = |a - a^*|$. Относительной погрешностью значения a^* (при $a \neq 0$) называется величина $\delta(a^*) = \dfrac{\Delta(a^*)}{|a|}$.

Результаты вычисления относительной и абсолютной погрешностей для оценивания отношения сигнал/шум для мультипликативного диагонального шума приведены в табл. 3 и мультипликативного вертикального шума в табл. 4.

Таблица 3 – Результаты оценивания отношения сигнал/шум
для мультипликативного диагонального шума предложенным методом

Истинное значение параметра шума	Оценка параметра шума	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
100	99,999	0,6253 e-012	0,0063 e-012
50	49,999	0,1137 e-012	0,0023 e-012
20	19,999	0,0568 e-012	0,0028 e-012
10	9,9999	0,2274 e-012	0,0227 e-012
5	4,9999	0,6253 e-012	0,1251 e-012
2	1,9999	0,4547 e-012	0,2274 e-012
1	0,9999	0,6821 e-012	0,6821 e-012

Таблица 4 – Результаты оценивания отношения сигнал/шум
для мультипликативного вертикального шума предложенным методом

Истинное значение параметра шума	Оценка параметра шума	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
100	99,9999	0,1279 e-012	0,0013 e-012
50	49,9999	0,0497 e-012	0,0010 e-012
20	19,9999	0,0568 e-012	0,0028 e-012
10	9,9999	0,0568 e-012	0,0057 e-012
5	4,9999	0,0462 e-012	0,0092 e-012
2	1,9999	0,0782 e-012	0,0391 e-012
1	0,9999	0,1030 e-012	0,1030 e-012

Сравнение полученных результатов оценивания параметра мультипликативного диагонального и вертикального шума предложенным методом (табл. 3, 4) проводилось с результатами оценивания этого же параметра методом работы [11] (табл. 5, 6). Для реализации метода работы [11] в зашумленном изображении считали стандартное отклонение std и вычисляли отношение сигнал/шум по формуле $q = \frac{n}{std^2}$, где n = 0,0925 для диагонального шума и n = 0,1920 для вертикального шума.

Таблица 5 – Результаты оценивания отношения сигнал/шум
для мультипликативного диагонального шума методом работы [11]

Истинное значение параметра шума	Оценка параметра шума	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
100	99,9993	0,7060 e-003	0,7060 e-005
50	49,9996	0,3530 e-003	0,7060 e-005
20	19,9999	0,1412 e-003	0,7060 e-005
10	9,9999	0,0706 e-003	0,7060 e-005
5	4,9999	0,0353 e-003	0,7060 e-005
2	1,9999	0,0141 e-003	0,7060 e-005
1	0,9999	0,0071 e-003	0,7060 e-005

Анализируя полученные результаты, заметим, что для мультипликативного диагонального шума абсолютная и относительная погрешность оценивания предложенным методом меньше, чем методом работы [11] в 4 раза при значениях отношения сигнал/шум 1 – 100 по мощности. Для мультипликативного вертикального шума абсолютная и относительная погрешность оценивания предложенным методом меньше, чем методом работы [11] в 3 раза при значениях отношения сигнал/шум 1 – 100 по мощности.

Таблица 6 – Результаты оценивания отношения сигнал/шум для мультипликативного вертикального шума методом работы [11]

Истинное значение параметра шума	Оценка параметра шума	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
100	100,0512	0,0512	5,1205 е-004
50	50,0256	0,0256	5,1205 е-004
20	20,0102	0,0102	5,1205 е-004
10	10,0051	0,0051	5,1205 е-004
5	5,0026	0,0026	5,1205 е-004
2	2,0010	0,0010	5,1205 е-004
1	1,0005	0,0005	5,1205 е-004

Таким образом в данной работе получены уравнения регрессии, которые позволяют оценить зависимость отношения сигнал/шум тестового изображения, пораженного мультипликативным шумом, от значений мультифрактальных показателей. Разработан метод оценивания параметра мультипликативного шума по мультифрактальному показателю. Результаты исследований показали, что разработанный метод оценивания параметра мультипликативного шума целесообразно применять для выбора типа и параметра предварительной обработки. Направлением дальнейшей работы является разработка новых методов оценки параметров мультипликативного шума.

Литература

1. Lee I.S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics / I.S. Lee // IEEE Trans. on PAMI. – 1980. – Vol. 2, № 3. – P. 165-168.
2. Kuan D.T. Adaptive noise smoothing filter for images with signal dependent noise / D.T. Kuan // IEEE Trans. on PAMI. – 1985. – Vol. 7, № 3. – P. 165-177.
3. Canny I. A computational approach to edge detection / I. Canny // IEEE Trans. on PAMI. – 1986. – Vol. 8, № 6. – P. 679-693.
4. Deriche R. Using Canny's criteria to derive an optimal edge detector recursively implemented / R. Deriche // International Gournal on Computer Vision. – 1987. – Vol. 1. – P. 167-187.
5. Kundur D. Blinol image deconvolution / D. Kundur, D. Hatzinakos // IEEE signal Processing Magazine. – 1996. – Vol. 13(3), № 5. – P. 43-64.
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. Beaurepaize L.B. Identification of the nature of the noise and estimation of its statistical parameters by analysis of local histograms / L. Beaurepaize, K. Chendi, B. Vozel // Proc. of ICASSP – 97. Munich, april 97. – P. 2805-2808.
8. Айвазян С.А. Прикладная статистика: исследование зависимостей / Айвазян С.А. Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 524 с.
9. Multifractal characterizations of nonstationary and intermittency in geophysical fields: Observed, retrieved or simulated / [Davis A., Marshak A., Wiscombe W., Cahalan R.] // Jornal of Geophysical Research. – 1994. – Vol. 99, № D4. – P. 8055-8072.
10. Математический энциклопедический словарь / [гл. ред. Ю. В. Прохоров; ред. кол.: С.И. Адян, Н.С. Бахвалов, В.И. Битюцков и др.]. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – 847 с.
11. Полякова М.В. Мультифрактальный метод автоматизированного распознавания помех на изображении / М.В. Полякова, В.Н. Крылов // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы. Межвузовский журнал. – 2005. – № 2 (16). – С. 40-46.

Ю.В. Ємець
Оцінювання параметра мультиплікативного шуму на зображенні за допомогою мультифрактальних показників
Розроблено метод оцінювання параметра мультиплікативного шуму за мультіфрактальним показником. Досліджені характеристики розробленого методу на тестових зображеннях.

Yu.V. Emets
Multiplicative Noise Parameter Evaluation on Image by means of Multifractal Indexes
The method of multiplicative noise parameter evaluation at a multifractal index is developed. Characteristics of the developed method are probed on the test images.

Статья поступила в редакцию 15.07.2010.